ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE CUBIERTA DE SAPROLITA SOBRE RELLENO DE ROCA EN BOTADEROS

Servicios Técnicos de Mina

Departamento de Geotecnia

Firma:

June 15, 2022
Kewalpersad Sattan

Introducción

El Botadero de Roca de Cobre Panamá, requiere la colocación de una cubierta de saprolita como parte del plan de rehabilitación progresiva, para cumplir con el sistema de gestión de aguas de contacto en la mina. El grosor de saprolita propuesto, a través de un modelo de manejo de aguas y filtraciones, varía entre 1 y 3 metros, donde el espesor de 1 metro, ofrece la mejor relación beneficio costo. El objetivo de esta evaluación, es determinar si la capa de 1 metro desempeña la mejor estabilidad.

El departamento de Geotécnia de mina, ha examinado esta inquietud realizando un análisis de estabilidad en 2 dimensiones. El paquete de software RocScience Slide 2D, se ha utilizado para realizar el análisis mediante la determinación del factor mínimo de seguridad, para el perfil de talud modelado.

El modelo de deslizamiento se ha creado con una sección vertical en 2 dimensiones, del diseño final del botadero, suministrado por el departamento de Planificación (Figura 1). La sección es tomada en una locación donde la pendiente es pronunciada y altamente expuesta, asumiendo que es más probable que la inestabilidad ocurra en ésta zona. La altura total y ángulo de la pendiente, son 167m y 21° respectivamente (Figura 2). El modelo simula la cubierta de saporlita en incrementos de 1m de ancho, de 1m a 3m sobre el relleno de roca del botadero.

Los parámetros de materiales aplicados en este modelo, provienen de materiales de referencia que son aceptados en análisis de estabilidad de botaderos y adecuados para el tipo de material presente en Cobre Panamá (Tabla 1).

Otros factores que generan inestabilidad en los botaderos son:

- Aumento de la presión de poro del material de relleno del botadero.
- Perímetro del botadero localizado en una fundación empinada.
- Pendiente pronunciada combinada con alta elevación de descarga.
- Sismos.

Estos factores no serán tomados en cuenta para éste análisis, ya que el principal enfoque es la estabilidad del relleno de saprolita sobre el relleno de roca estéril.

En cuanto a la saturación del relleno de saprolita, se estima que, con la intensidad de lluvias en Cobre Panamá, se debe mantener por debajo del cincuenta porciento (50%), brindando suficiente estabilidad.

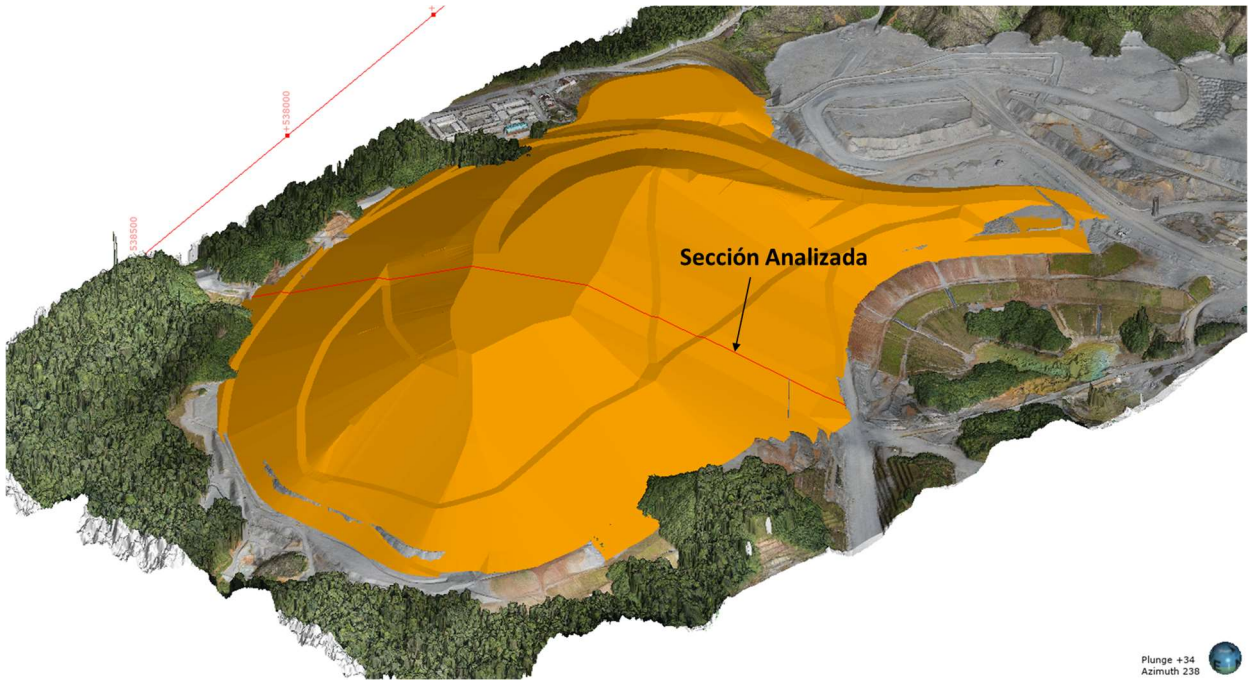


Figura 1 – Diseño de remediación de botadero.

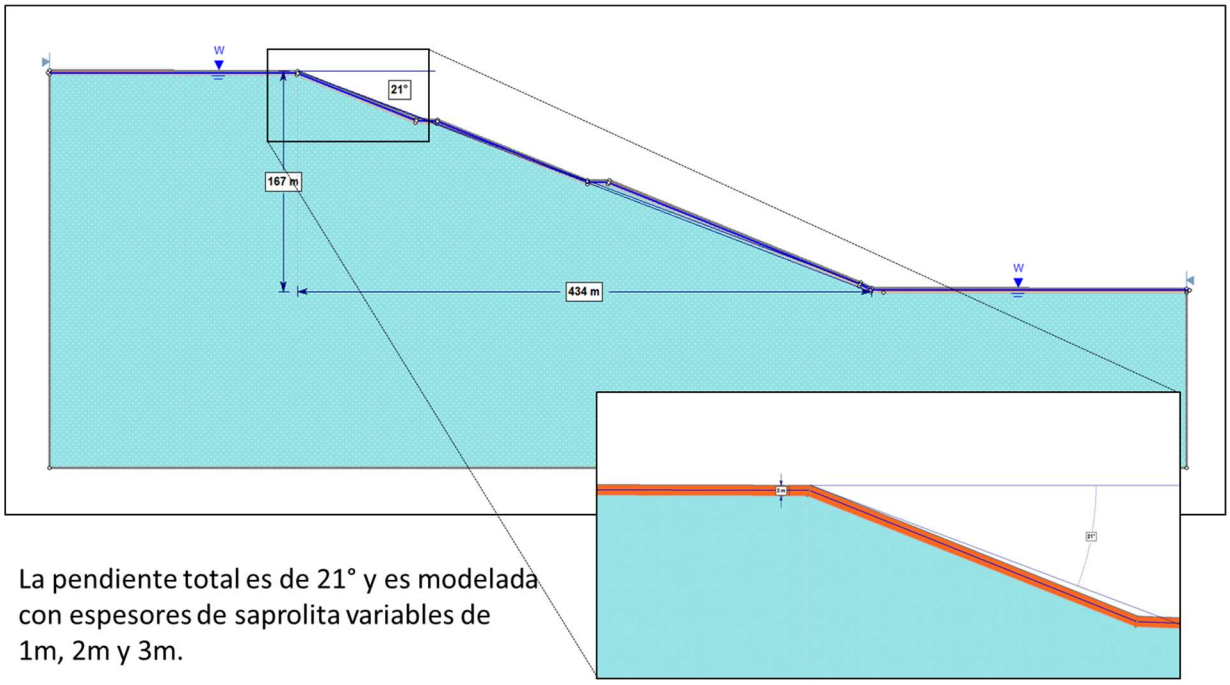


Figura 2 – Sección vertical de remediación de botadero, modelado en Slide 2D. Se ilustra la dimensión de la pendiente y capa de saprolita.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25

Tabla 1 – Propiedades de materiales para parámetros del modelo.

Metodología

El método de análisis de límite de equilibrio para pendiente estática, es una herramienta utilizada para análisis de estabilidad de un determinado suelo o talud de roca. El programa RocScience Slide 2D realiza el análisis, basado en el principio de límite de equilibrio. Considera un suelo continuo de diferentes estratos, con una superficie de falla dada, en forma de líneas o arcos, calculando un Factor de Seguridad mínimo mediante la aplicación de fuerza y momento de equilibrio.

El Factor de Seguridad (FS) se define como la relación entre la fuerza o momento resistente y la fuerza o momento impulsor. Por lo tanto, si una superficie de falla tiene un FS de 1, entonces está en el límite de equilibrio aceptable. Un FS inferior a 1 significa que las fuerzas impulsoras son mayores que las fuerzas de resistencia y la pendiente fallará, ya sea en rotación, traslación o una combinación de las mismas.

El modelo consiste en relleno de saprolita y relleno de roca (Figura 2). Por su naturaleza heterogénea, es más probable que las superficies de deslizamiento ocurran con formas no circulares. Existen varios métodos de cálculo para calcular los FS de una masa determinada. Los métodos Janbu Simplificado, Spencer y GLE/Morgenstern- Price, de cálculo de FS se seleccionan para éste análisis y el resultado se interpreta de acuerdo con GLE, ya que satisface las condiciones de fuerza y momento.

El agua subterránea se modela dibujando una línea de nivel freático (Figura 2), que puede ser asignada a una unidad o múltiples unidades de material. El material debajo de la línea de nivel freático está completamente saturado. Para comprender el impacto del agua subterránea, se calculan cuatro escenarios para cada capa de saprolita de 1m, 2m y 3m de espesor. Estos 4 escenarios son:

1. Condición seca: el modelo asume que no hay presencia de agua en ninguno de los materiales.
2. Saturación del 50% en relleno de saprolita y material no saturado debajo de la saprolita: el nivel freático se dibuja al nivel medio del relleno de saprolita, indicando que sólo la saprolita debajo de la línea, está saturada.

3. Saturación del 100% en relleno de saprolita: el nivel freático se dibuja en la parte superior de la saprolita indicando su saturación total.
4. Ambos materiales saturados: el nivel freático se dibuja en la parte superior del modelo, indicando que los rellenos de saprolita y roca se encuentran saturados.

Resultados

El programa Slide 2D ha producido 12 resultados que muestran los valores mínimos de FS y sus respectivas superficies de deslizamiento. Los resultados para la capa de 1m de saprolita, se muestran en la Figura 3 (resultados del modelado en el anexo adjunto). Para la capa de 1m de saprolita, se logra la estabilidad adecuada en 3 de los 4 escenarios de saturación. El escenario de ambos materiales saturados, ha producido un FS menor a 1, indicando que la presencia de agua está afectando la estabilidad del talud.

Capa de saprolita 1m

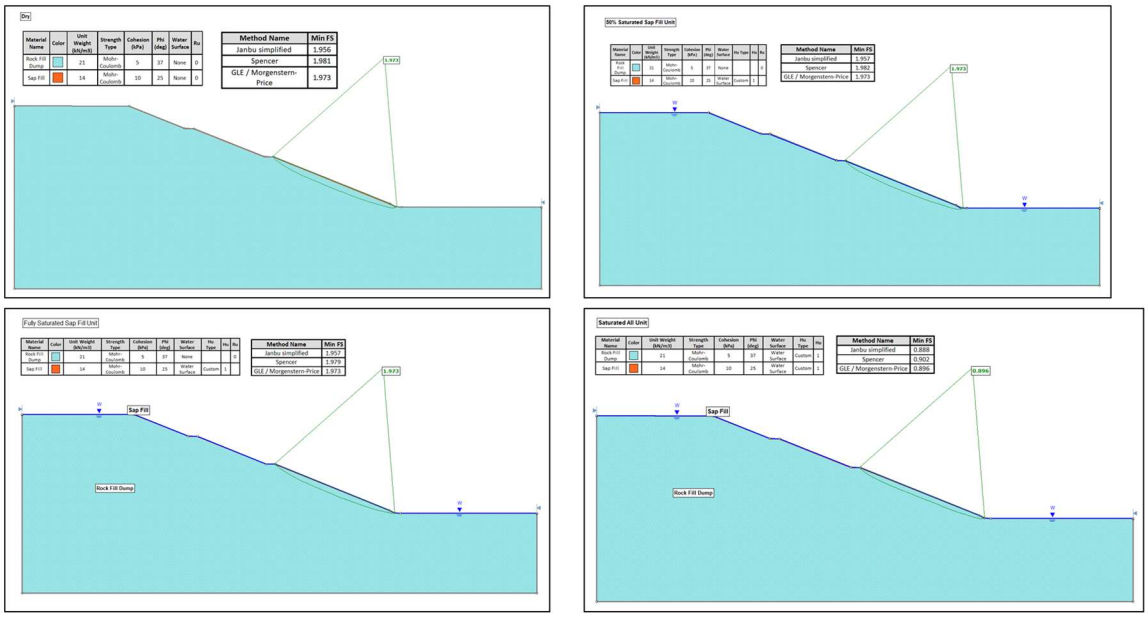

Dry
Method Name | Min FS
Janbu simplified | 1.956
Spencer | 1.981
GLE / Morgenstern-Price | 1.973
60% Saturated Sap Fill Unit
Method Name | Min FS
Janbu simplified | 1.957
Spencer | 1.982
GLE / Morgenstern-Price | 1.973
Fully Saturated Sap Fill Unit
Method Name | Min FS
Janbu simplified | 1.957
Spencer | 1.979
GLE / Morgenstern-Price | 1.973
Saturated All Unit
Method Name | Min FS
Janbu simplified | 0.888
Spencer | 0.902
GLE / Morgenstern-Price | 0.896
Sap Fill
Rock Fill Dump

Figura 3 – Interpretación de resultados para capa de saprolita de 1 metro.

Todos los valores de FS obtenidos se presentan en la Tabla 2. Los valores por debajo de 1.3 están resaltados en rojo, indicando escenarios que no cumplen con los criterios de aceptación

establecidos para este análisis. Aquellos escenarios que no cumplan con los criterios establecidos están relacionados con la presencia de agua y aumento del espesor de la capa de relleno de saprolita. La inestabilidad ocurre en condiciones donde el relleno de saprolita está completamente saturado, excepto por la capa de saprolita de 1m de espesor. Para condiciones de saturación completa en ambos materiales, todas las capas fallan cuando la superficie de falla atraviesa el relleno de roca.

En particular, el escenario con una saturación del 50 por ciento en el relleno de saprolita, que se asume como la condición probable en Cobre Panamá, produce valores de FS que cumplen con los criterios para las 3 capas de espesor de saprolita. Sin embargo, aumentar el espesor hasta los 3m reduce el FS cerca de la aceptación mínima de 1.3 y requerirá un cuidado especial si se toma la decisión de colocar una cubierta de saprolita de este espesor.

Valores de FS para diferentes escenarios y espesores de capas de saprolita

Sap Thickness	1m	2m	3m
Dry	1.77	1.97	1.80
50% Saturated Sap Fill	1.97	1.97	1.31
Fully Saturated Sap Fill	1.97	1.11	0.86
Saturated All Unit	0.89	0.79	0.68

Tabla 2 – Valores de FS obtenidos en todos los escenarios.

Conclusiones y Recomendaciones

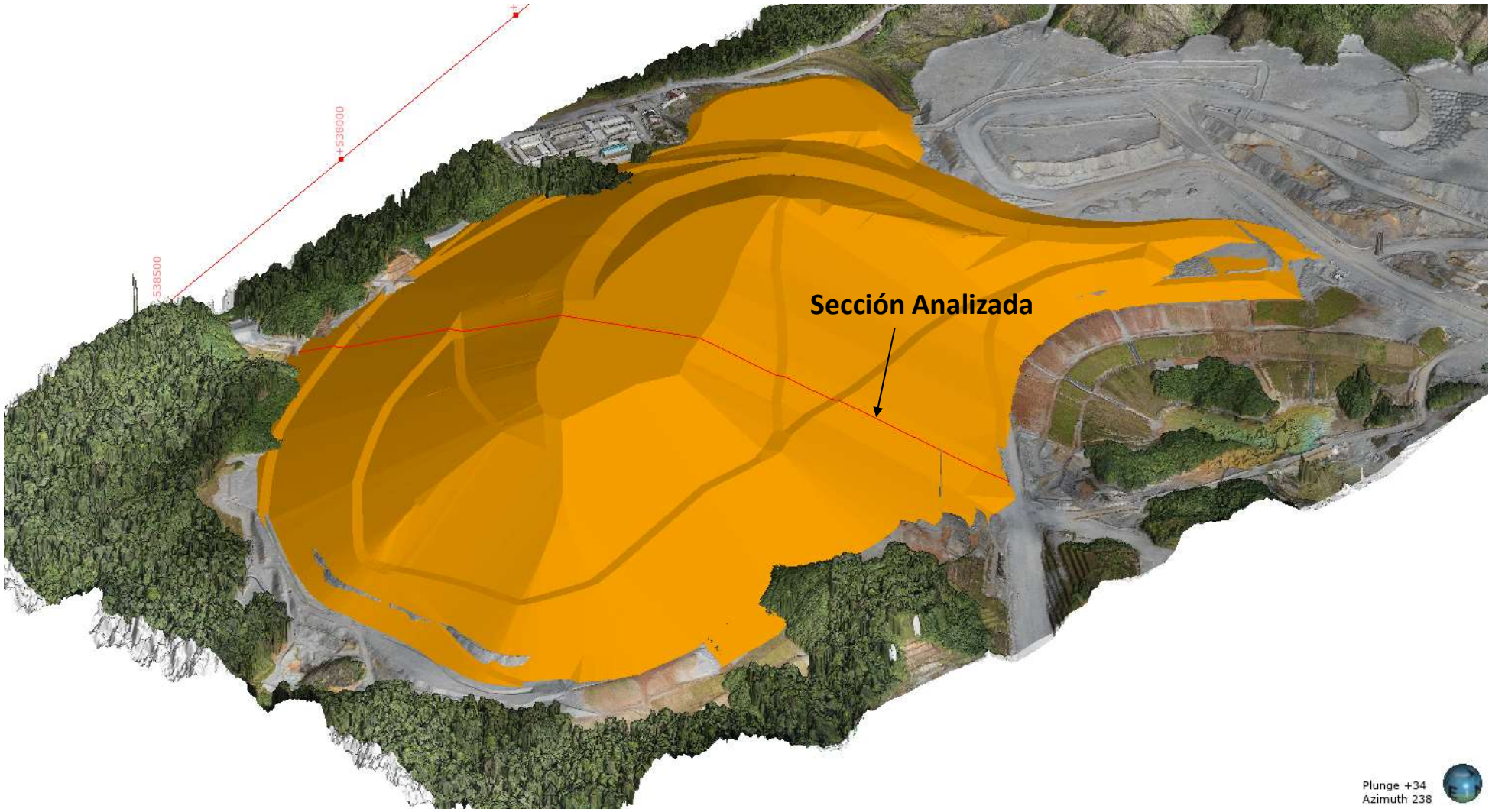
Los resultados del análisis indican que se obtiene una estabilidad adecuada para los tres escenarios modelados, asumiendo que la saturación del agua subterránea dentro de la capa de saprolita permanece por debajo del 50 por ciento. Para escenarios donde el relleno de saprolita y el relleno de roca están completamente saturados, el espesor de la capa de saprolita afecta negativamente el rendimiento de la estabilidad con FS menor a 1, lo que indica que la inestabilidad es probable.

Un nivel freático elevado en el material de relleno del botadero tiene la mayor influencia adversa en la estabilidad de taludes; por lo tanto, se recomienda tener un sistema de monitoreo de aguas subterráneas, así como un plan de recuperación que detalle cómo se colocará el relleno de roca junto con la construcción de la capa de saprolita.

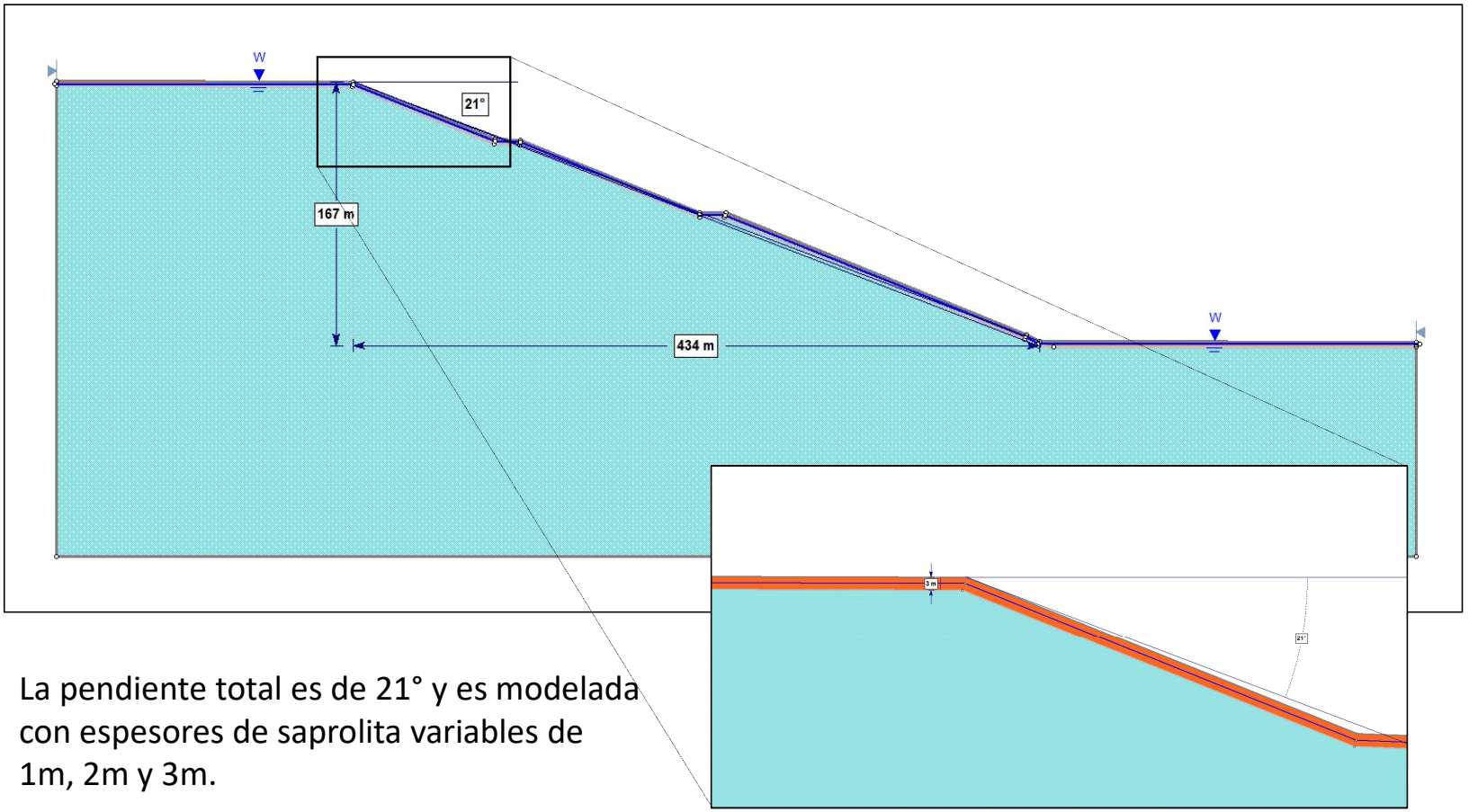
Dado que el aumento en el espesor de saprolita se relaciona con valores bajos de FS, se recomienda mantener la capa de saprolita al mínimo posible para una mayor estabilidad.

ANEXOS

Diseño Final de Remediación Botadero



Geometría y dimensiones de la pendiente



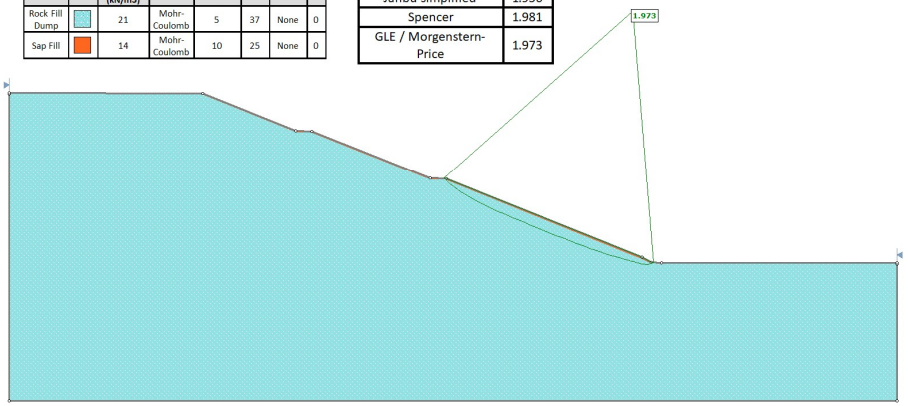
La pendiente total es de 21° y es modelada con espesores de saprolita variables de 1m, 2m y 3m.

Capa de saprolita 1m

Dry

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None	0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	None	0

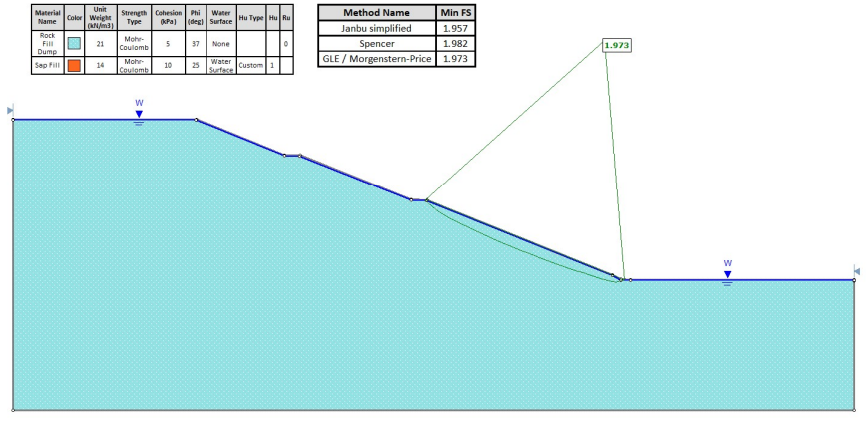
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.956
Spencer	1.981
GLE / Morgenstern-Price	1.973



50% Saturated Sap Fill Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None			0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1	

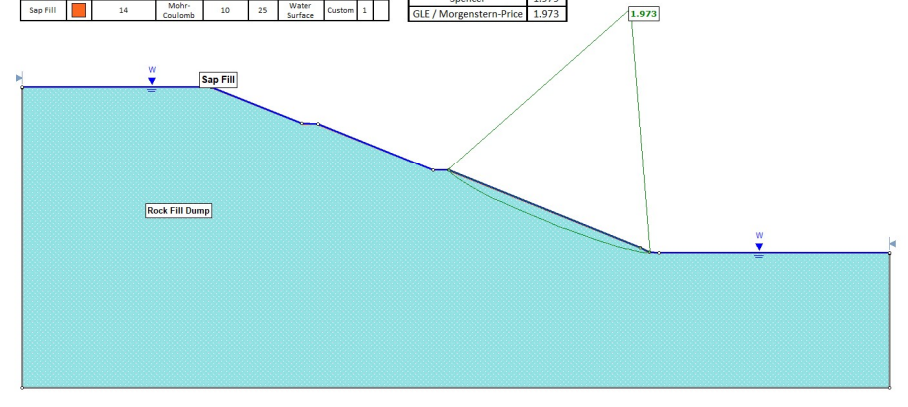
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.957
Spencer	1.982
GLE / Morgenstern-Price	1.973



Fully Saturated Sap Fill Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None			0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1	

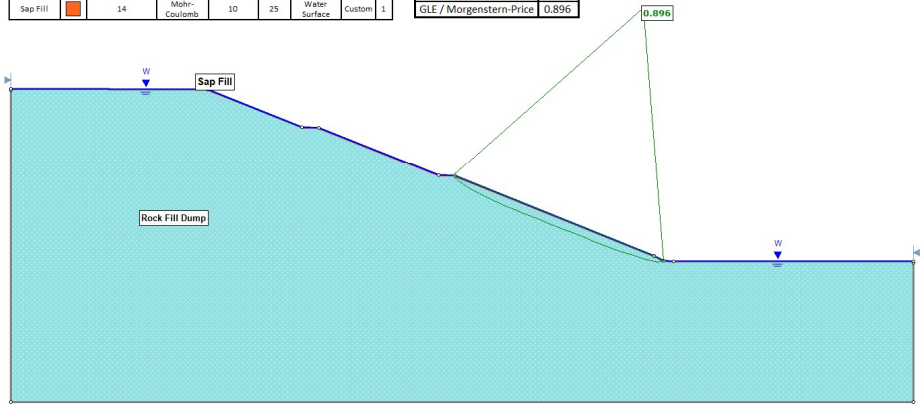
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.957
Spencer	1.979
GLE / Morgenstern-Price	1.973



Saturated All Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	Water Surface	Custom	1
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1

Method Name	Min FS
Janbu simplified	0.888
Spencer	0.902
GLE / Morgenstern-Price	0.896

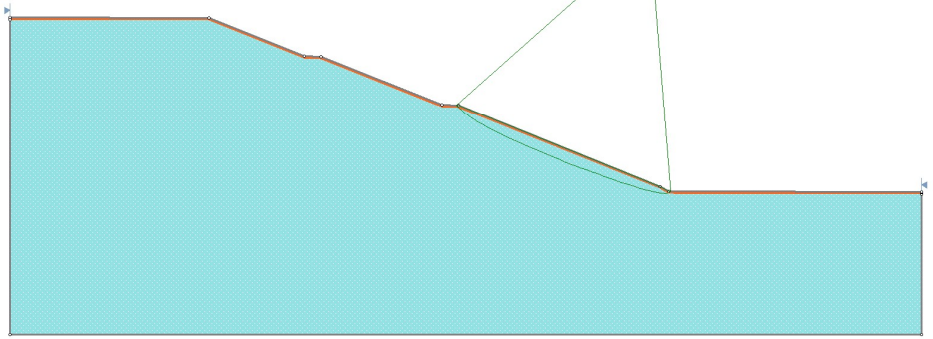


Capa de Saprolita 2m

Dry

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None	0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	None	0

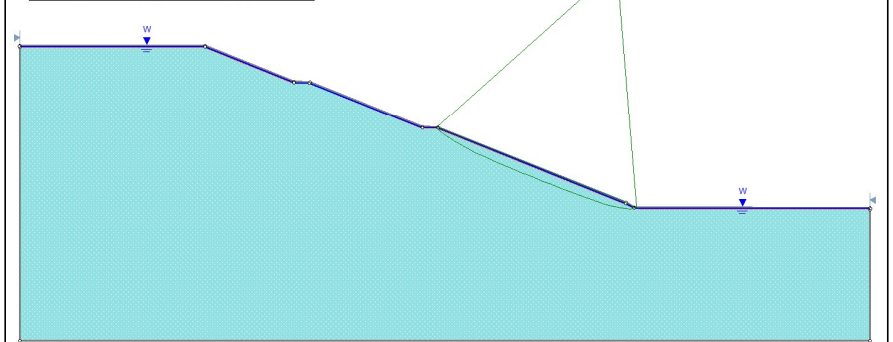
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.959
Spencer	1.982
GLE / Morgenstern-Price	1.974



50% Saturated Sap Fill Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None			0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1	

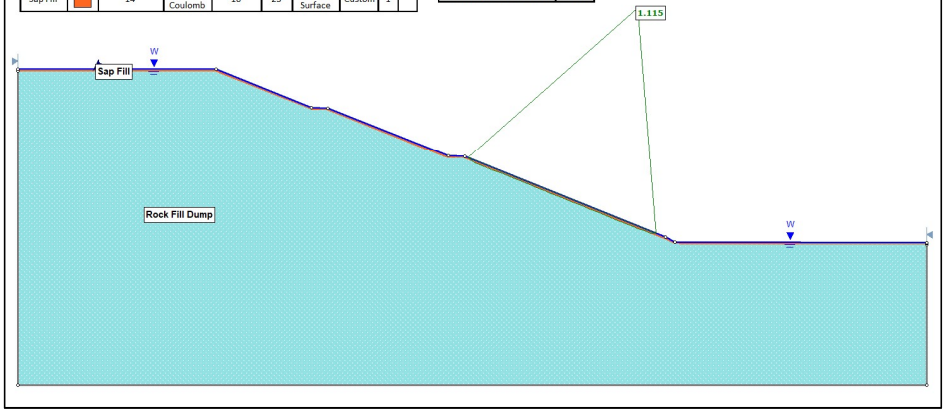
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.957
Spencer	1.981
GLE / Morgenstern-Price	1.974



Fully Saturated Sap Fill Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None			0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1	

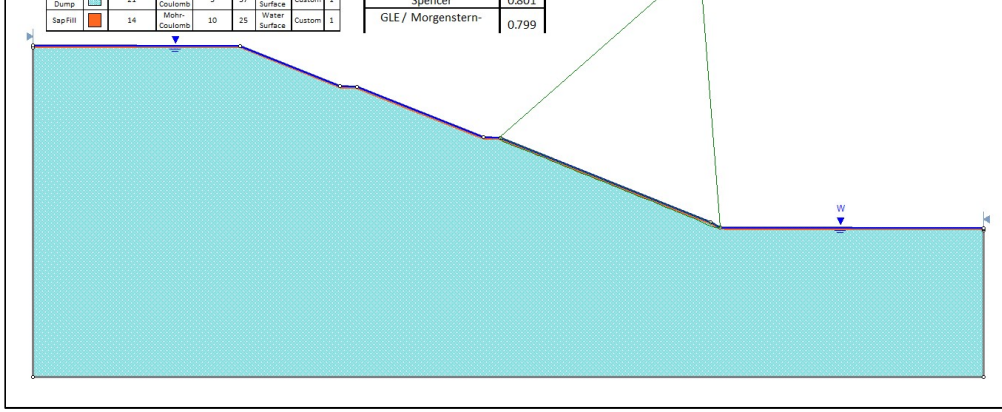
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.114
Spencer	1.118
GLE / Morgenstern-Price	1.115



Saturated All Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	Water Surface	Custom	1
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1

Method Name	Min FS
Janbu simplified	0.799
Spencer	0.801
GLE / Morgenstern-	0.799

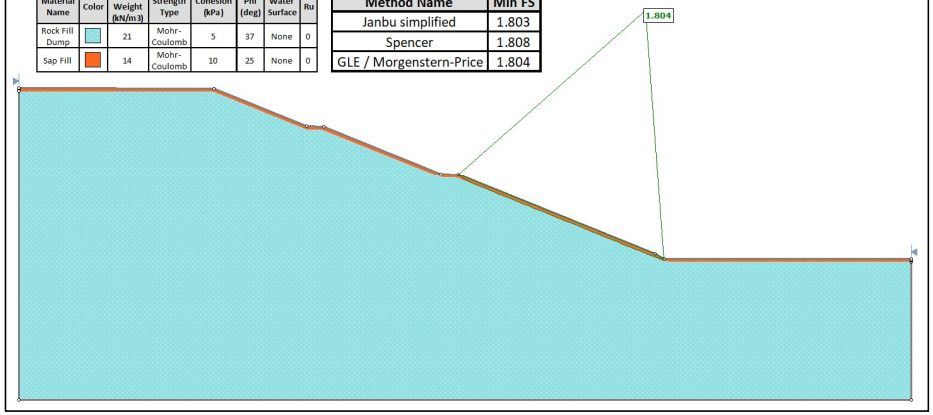


Capa de saprolita 3m

Dry

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None	0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	None	0

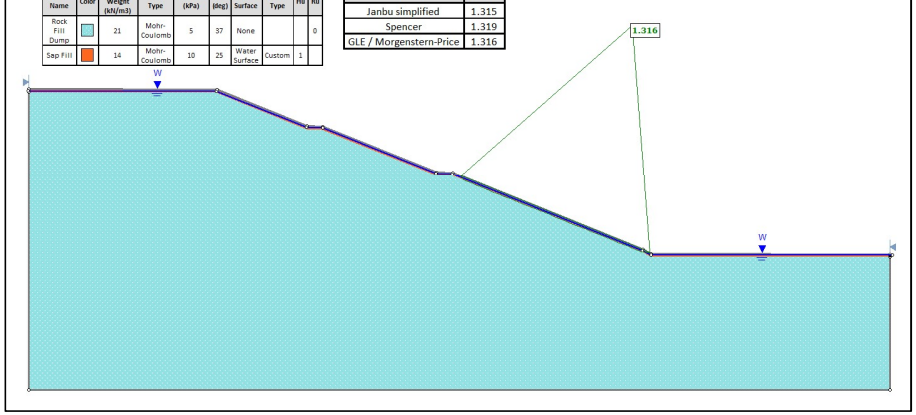
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.803
Spencer	1.808
GLE / Morgenstern-Price	1.804



50% Saturated Sap Fill Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None			0
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1	

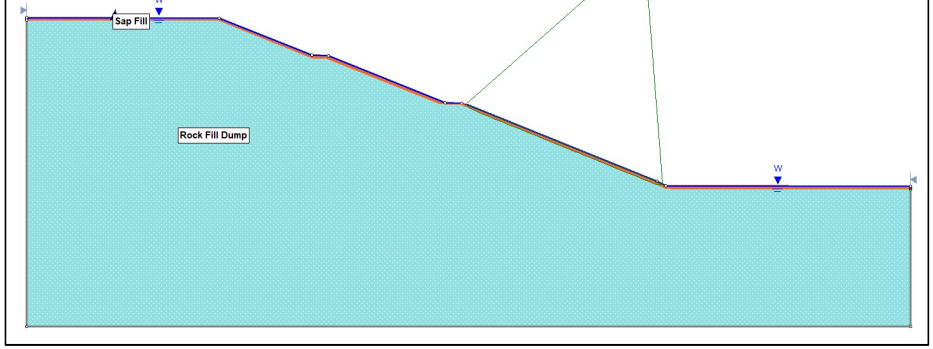
Method Name	Min FS
Janbu simplified	1.315
Spencer	1.319
GLE / Morgenstern-Price	1.316



Fully Saturated Sap Fill Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	None			0

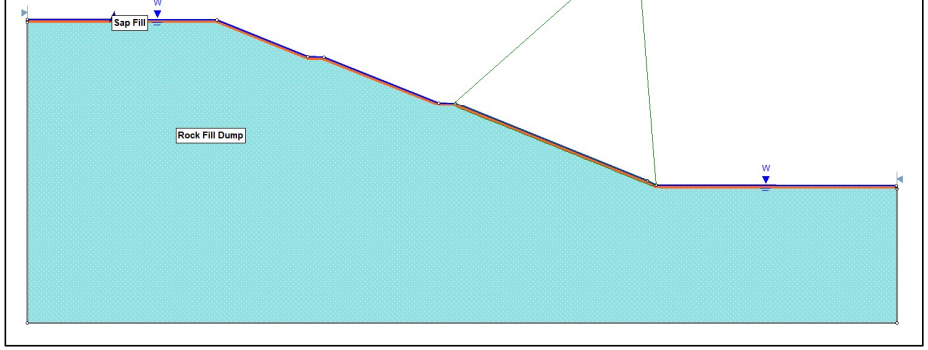
Method Name	Min FS
Janbu simplified	0.863
Spencer	0.869
GLE / Morgenstern-Price	0.863



Saturated All Unit

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Hu Type	Hu
Rock Fill Dump		21	Mohr-Coulomb	5	37	Water Surface	Custom	1
Sap Fill		14	Mohr-Coulomb	10	25	Water Surface	Custom	1

Method Name	Min FS
Janbu simplified	0.682
Spencer	0.686
GLE / Morgenstern-Price	0.682



Resúmen

Valores de FS para diferentes escenarios y espesores de capas de saprolita

Sap Thickness	1m	2m	3m
Dry	1.77	1.97	1.80
50% Saturated Sap Fill	1.97	1.97	1.31
Fully Saturated Sap Fill	1.97	1.11	0.86
Saturated All Unit	0.89	0.79	0.68

- La tabla proporciona una descripción general de los valores de factor de seguridad (FS) obtenidos para los diversos escenarios analizados. Para este análisis, los valores > 1,3 para las superficies de deslizamiento que se forman solo a través del área de relleno de saprolita y por debajo, se consideran aceptables y proporcionan suficiente estabilidad.
- El análisis indica que en condición seca y cuando el relleno de saprolita está saturado al 50%, no hay riesgo de inestabilidad.
- La presencia de agua es el factor sensible que impulsa la inestabilidad de la pendiente para todos los escenarios que no cumplen con los criterios de aceptación de FS >1.3
- La comprensión adecuada del comportamiento del agua subterránea dentro del material del botadero, será imprescindible para garantizar la estabilidad del botadero.
- Consultando con el departamento de Hidrología de mina y basado en previas experiencias del comportamiento de las aguas subterráneas dentro de los botaderos, se ha asumido que el relleno de saprolita permanecerá seco y que es poco probable que alcance saturación del 50%. En cuanto a la porción del relleno de roca, el agua subterránea seguirá la topografía inicial de la fundación y será ligeramente mayor en el centro del botadero.
- Teniendo en cuenta todo lo anterior, no existe una gran preocupación por la inestabilidad de taludes para cubrir el botadero con un espesor de saprolita de hasta 3m.